

DOI: 10.11779/CJGE2015S1037

# Q<sub>3</sub>原状非饱和黄土的水量变化和临界状态特性

张登飞<sup>1, 2</sup>, 陈存礼<sup>1, 2\*</sup>, 李文文<sup>1</sup>, 于佃博<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘 要:** 用双室非饱和土三轴仪, 对 Q<sub>3</sub> 原状黄土进行一系列控制吸力的各向均等压缩及同时控制吸力和净围压的三轴排水剪切试验, 分析了吸力, 净围压及应力路径对非饱和原状黄土临界状态及水量变化特性的影响, 提出了各向均等压缩及三轴剪切应力条件下水土体积比与净平均应力关系的表达式、偏应力与净平均应力临界状态关系模式。研究表明: 应力路径对非饱和原状黄土水量变化的影响显著, 随着净平均应力增大, 等向压缩应力条件下处于排水状态, 剪切应力条件下视吸力及净围压的大小可能处于吸水或排水状态, 不同试验条件下水土体积比与净平均应力或其增量之间对数关系呈二段直线。吸力对偏应力与净平均应力临界状态线的影响皆随着净围压增大而减小, 不同吸力(大于 0)下水土体积比与净平均应力的对数关系临界状态线皆近似为平行直线。

**关键词:** Q<sub>3</sub> 非饱和原状黄土; 三轴试验; 吸力; 临界状态; 水量变化

**中图分类号:** TU411

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2015)S1-0197-05

**作者简介:** 张登飞(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事非饱和土工程特性研究方面的工作。E-mail: dfzhang1987@163.com。

## Characteristics of critical state and water volume change for Q<sub>3</sub> unsaturated intact loess

ZHANG Deng-fei<sup>1, 2</sup>, CHEN Cun-li<sup>1, 2</sup>, LI Wen-wen<sup>1</sup>, YU Dian-bo<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Loess Mechanics and engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** A series of isotropic compression tests with controlled suction and triaxial drained shear tests with controlled suction and net cell pressure are performed on Q<sub>3</sub> intact loess by using a double-walled triaxial test apparatus for unsaturated soils. The influences of the suction, net confining pressure and stress path on the critical state and water volume change of intact unsaturated loess are analyzed. The models describing water ratio versus the net mean stress ( $e_w-p$ ) under isotropic compression and triaxial shear stress, and the critical state lines (CSLs) on the deviator stress versus the net mean stress ( $q-p$ ) plane are proposed. The results show that the stress path has significant influences on water volume change of unsaturated intact loess. The pore water drains from the specimen under isotropic compression, and with the increase of the net mean stress, the absorbing or draining water depends on the size of the suction and net confining pressure under shear stress. The logarithmic relationships between water ratio and the net mean stress or its increment present a binary linear under different test conditions. The effects of suction on the CSLs of the deviator stress versus the net mean stress ( $q-p$ ) decrease as the net confining pressure increases. The CSLs of water ratio versus the net mean stress ( $e_w-\ln p$ ) are parallel under different suctions which are greater than zero.

**Key words:** Q<sub>3</sub> unsaturated intact loess; triaxial test; suction; critical state; water volume change

## 0 引 言

湿陷性黄土是广泛地分布在中国西北地区的一种具有水敏性的特殊土。随着西北大开发战略的实施, 黄土场地工程建设中遇到的非饱和土问题日益广泛和严重, 如降雨或生活生产用水入渗, 及常含水率条件下加载过程中产生的超孔隙水压力等, 所引起的土工建筑物不均匀沉降或高边坡失稳。对这些问题的解决依赖于对非饱和黄土工程特性的深入认识, 需同时关

注非饱和黄土强度随含水率变化规律, 以及加载过程中水量变化特性。黄土作为典型的非饱和土, 20 世纪末又一次活跃的非饱和土力学理论不能不涉及黄土特

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50878183); 陕西省教育厅省级重点实验室重点科研项目(14JS063); 西安理工大学 2012 年度特色研究计划项目(118-211302)

**收稿日期:** 2015-03-26

\*通讯作者

殊的力学特性<sup>[1]</sup>, 研究黄土的基本特性成为一种趋势。近年来, 国内学者采用非饱和土直剪仪和三轴仪对重塑或原状非饱和黄土的力学特性进行了试验研究, 取得了许多有价值的成果<sup>[2-8]</sup>。但是, 大多侧重于  $Q_3$  重塑黄土及  $Q_2$  原状黄土<sup>[2, 4-5]</sup>, 对  $Q_3$  原状黄土的研究较少, 而黄土地区的工程问题大多出现在  $Q_3$  黄土中, 文献[6~8]对  $Q_3$  原状黄土抗剪强度进行了研究, 未涉及土中水量变化。为此, 本文以西安地区的  $Q_3$  原状黄土作为研究对象, 进行控制吸力及净围压的等向压缩和固结排水三轴剪切试验, 研究原状非饱和黄土的强度及水量变化特性。

## 1 试验方案与方法

### 1.1 试验土样

试验用土取自西安北郊的  $Q_3$  原状黄土, 取土深度 3~4 m, 土粒的相对密度  $G=2.70$ , 液限  $w_L=30.04\%$ , 塑限  $w_P=19.45\%$ , 天然含水率  $w_0=16.61\%$ , 干密度  $\rho_{d0}=1.26 \text{ g/cm}^3$ 。用专门的三轴削样器, 切削直径 3.91 cm, 高度 8 cm 的原状土试样。选取干密度平均值为  $1.26 \text{ g/cm}^3$ , 且彼此差值小于  $0.03 \text{ g/cm}^3$  的试样进行试验, 以减小干密度差异的影响。

### 1.2 试验方案

为研究原状黄土的强度及水量变化特性, 共进行 2 种应力路径三轴试验: ①控制吸力的等向压缩试验。净平均应力  $p$  分级施加, 加载等级为 25, 50, 100, 200, 400, 600 kPa。②控制吸力和净围压的固结排水三轴剪切试验。在各向等压下固结, 控制的净围压  $\sigma_3$  分别为 50, 100, 200, 400, 600 kPa。

上述两种类型试验中, 控制的吸力  $s$  皆分别为 0, 50, 100, 200 kPa; 由于仪器承压能力有限,  $s=200 \text{ kPa}$  时, 控制的最大净围压 600 kPa 皆调整为 500 kPa。

### 1.3 试验仪器及方法

试验仪器为西安力创试验仪器有限公司与西安理工大学岩土工程研究所联合研制的微机控制三轴试验仪, 根据非饱和土三轴试验要求进行了改造, 具体仪器结构及功能详见文献[3]。

无应力作用下, 测出试样吸力  $s$  为 200, 100, 50 kPa 所对应的试样含水率  $w$  分别为 14.0%, 17.0%, 21.75%, 天然含水率试样的吸力为 125 kPa。由于在仪器上把天然含水率试样通过增(减)湿方法达到控制吸力需要的时间很长。为节约时间, 在试验前, 通过增(减)湿的方法把天然含水率  $w_0$  试样改变为控制吸力对应的含水率。

控制吸力和净围压的固结排水三轴剪切试验包括吸力平衡、等吸力固结及排水剪切 3 个阶段。首先, 在静围压为 5 kPa (为了使乳胶膜紧贴试样) 时平衡吸

力  $s$ , 即控制孔隙气压力  $u_a=s$ , 打开排水阀 ( $u_w=0$ ), 待排水稳定后, 进入控制吸力等向压缩阶段, 逐渐施加净围压至所设定的  $\sigma_3$ , 在等向压缩稳定后, 进入  $s$  和  $\sigma_3$  保持不变的三轴排水剪切阶段, 控制的常应变加载速率为  $0.004 \text{ mm/min}$ 。控制吸力的等向压缩试验包括吸力平衡, 控制吸力的等向压缩二个阶段, 其试验方法同固结排水三轴剪切试验的前二个阶段。等向压缩试验稳定标准为试样的体变增量及排水增量皆小于  $0.012 \text{ cm}^3/(2 \text{ h})$ 。

## 2 控制吸力等向压缩试验结果及分析

由每级净平均应力  $p=\sigma_3$  下压缩稳定后的排水量, 计算出水土体积比  $e_w (=V_w/V_s=G_w)$ ,  $V_w$  与  $V_s$  分别为水及土的体积,  $e_w$  减小表示排水, 增大表示吸水。不同吸力下, 水土体积比  $e_w$  与  $p$  之间的  $e_w - \ln p$  关系如图 1 所示。可以看出:

(1) 随  $p$  的增大,  $e_w$  减小, 即控制吸力等向压缩应力条件下, 净平均应力的增大使水从试样中流出, 处于排水状态。

(2)  $e_w - \ln p$  关系曲线由二个阶段组成, 且试验点近似位于两相交的直线段上, 交点处对应的净平均应力为  $p_{yw}=33, 94, 115, 150 \text{ kPa}$ , 与屈服应力  $p_{y0}$  基本相等, 说明净平均应力对水量与体积变化的影响规律有较好的一致性 (篇幅所限, 略去压缩及屈服特性)。当  $p \leq p_{yw}$  时, 随着  $p$  的增大,  $e_w$  缓慢减小;  $p > p_{yw}$  时,  $e_w$  减小速度较大, 且饱和土明显比非饱和土的大。这与重塑粉土的研究结果<sup>[9]</sup>相一致, 而与重塑黄土的含水率与净平均应力之间呈线性关系的研究结果<sup>[2]</sup>不同。说明水量变化特性与土的种类及结构性有关。

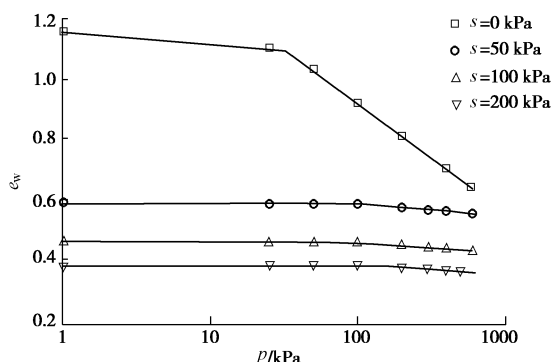


图 1 等向压缩试验的  $e_w - p$  曲线

Fig. 1  $e_w - p$  curves from isotropic compression tests

(3) 不同吸力下, 屈服前后  $e_w - \ln p$  直线的斜率  $\kappa_w(s)$ ,  $\lambda_w(s)$  值见表 1。可以看出,  $\kappa_w(s)$ ,  $\lambda_w(s)$  皆随  $s$  的增大而减小, 减小速率与  $s$  的大小有关。  $s \leq 50 \text{ kPa}$  时, 减小速率很大;  $s > 50 \text{ kPa}$  时, 变化较小,  $\kappa_w(s)$ ,  $\lambda_w(s)$  与平均值 (分别为 0.00077, 0.0145) 相差较小, 可以不考虑吸力的影响, 分别近似取其平均值。

表 1 等向压缩试验的土性参数

Table 1 Soil parameters for isotropic compression tests				
$s$ /kPa	$p_{yw}$ /kPa	$\kappa_w/s$	$\lambda_w/s$	$S_{r0}$ /%
0	33	0.0180	1.1580	100.0
50	94	0.0010	0.0149	49.6
100	115	0.0007	0.0145	37.9
200	150	0.0006	0.0140	32.9

3 控制吸力及净围压的固结排水三轴剪切试验结果及分析

3.1 水量变化特性

由不同净围压下等向压缩及三轴剪切过程中的体变量及排水量, 计算出固结后及剪切破坏时的饱和度  $S_{re}$  及  $S_{rf}$  (见表 2), 剪切过程中水土体积比  $e_w$ 。不同试验条件下水土体积比  $e_w$  与净平均应力增量  $p-p_c$  ( $p=q/3+\sigma_3$ ) 间  $e_w-\ln(p-p_c)$  关系曲线如图 2 所示。可以看出:

(1) 对于饱和土, 不同  $\sigma_3$  下  $e_w-\ln(p-p_c)$  曲线呈先平缓后陡变的下降趋势 (图 2 (a)), 即三轴剪切过程中  $e_w$  随  $p-p_c$  的增大呈先平缓后快速减小, 试样先缓慢后快速排水 (流出)。

(2)  $s$  ( $s=50$  kPa) 较小时, 非饱和原状黄土的  $e_w-\ln(p-p_c)$  关系曲线型式与  $\sigma_3$  的大小有关。 $\sigma_3$  较大 ( $\sigma_3\geq 200$  kPa) 时,  $e_w-\ln(p-p_c)$  曲线呈先基本不变后下降的趋势 (图 2 (b)), 即三轴剪切过程中  $e_w$  随  $p-p_c$  的增大呈先基本不变后减小, 试样的含水率先基本不变后减小 (水流出试样), 这是由于  $\sigma_3$  较大时, 固结后 (剪切前) 试样的饱和度  $S_{re}$  皆较大 (见表 2), 使其水量变化特性和饱和土的类似所致, 但变化量要比饱和土小许多;  $\sigma_3$  较小 ( $\sigma_3\leq 100$  kPa) 时,  $e_w-\ln(p-p_c)$  曲线由先基本不变后较快上升两个阶段组成 (图 2 (b)), 即  $e_w$  随  $p-p_c$  的增大呈先基本不变后增大, 试样的含水率先基本不变后增大 (水流入试样)。

(3)  $s$  较大 ( $s\geq 100$  kPa) 时,  $\sigma_3$  对  $e_w-\ln(p-p_c)$  曲线型式没有影响。不同  $\sigma_3$  下,  $e_w-\ln(p-p_c)$  曲线皆由先基本不变后较快上升两个阶段组成 (图 2 (c)), 即剪切过程中  $e_w$  随  $p-p_c$  的增大呈先基本不变后增大, 试样的含水率先基本不变后增大 (水流入试样)。上述表明, 在剪切过程中非饱和原状黄土的吸排水情况与吸力  $s$  及围压  $\sigma_3$  大小有关, 而与试样的剪缩 (由于篇幅所限, 略去体应变变化特性) 没有必然的联系, 这与粉土的研究结果<sup>[10]</sup>相一致。

(4) 固结排水三轴剪切过程中, 原状非饱和黄土的体积缩小, 饱和度  $S_r$  随着  $p$  的增大而增大, 但除  $s$  (50 kPa) 较小,  $\sigma_3$  较大 ( $\sigma_3\geq 200$  kPa) 时,  $e_w$  随  $p$  的增大而减小外,  $e_w$  皆随  $p$  的增大而增大, 这与等向

压缩过程中  $e_w$  随  $p$  而减小 (图 1) 不一致。反映出应力路径对原状黄土水量变化特性有显著的影响, 这可能是由于应力路径对原状黄土的结构性有明显的影 响所致, 需要进行微观试验, 做进一步的机理分析研究。

(5) 不同试验条件下,  $e_w-\ln(p-p_c)$  关系试验点皆位于二相交直线上, 把转折点前后二段斜率分别用  $\kappa_{ws}(s)$ ,  $\lambda_{ws}(s)$  表示, 转折点对应的净平均应力增量用  $p_{yws}$  表示。为了区别排水与吸水情况,  $\lambda_{ws}(s)$  为正值表示排水, 负值表示吸水。

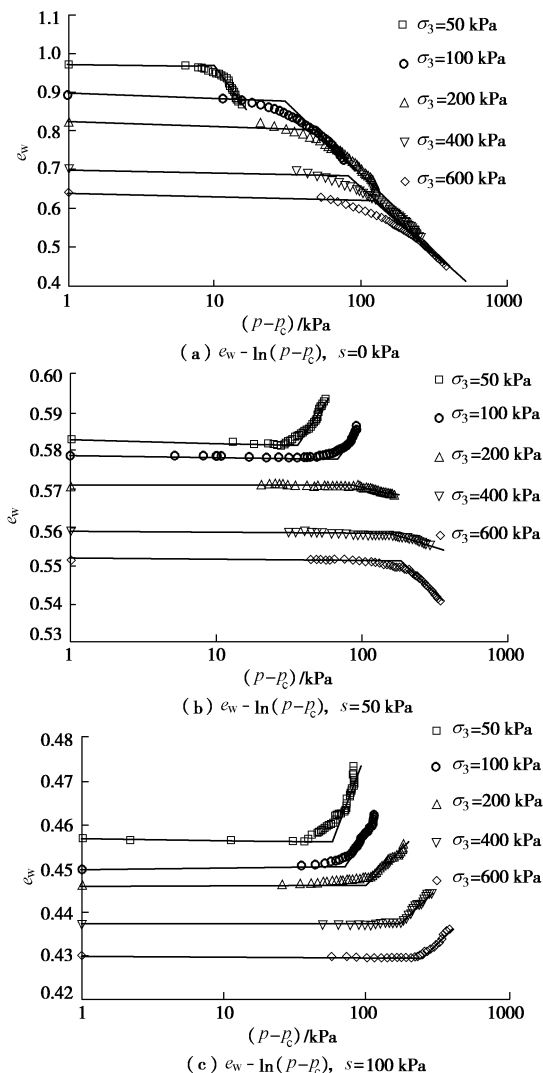


图 2 三轴剪切试验的  $e_w-\ln(p-p_c)$  曲线

Fig. 2  $e_w-\ln(p-p_c)$  curves from triaxial shear tests

(6) 不同  $\sigma_3$  下, 饱和土及非饱和土的  $\kappa_{ws}(s)$  分别在 0.004~0.007 及 0.00007~0.00016 之间变化, 表明对于饱和土, 剪切阶段  $\kappa_{ws}(s)$  比非饱和的大, 但比等向压缩时  $\kappa_w(s)$  (表 1) 明显减小,  $\sigma_3$  对  $\kappa_{ws}(s)$  影响很小; 对于非饱和土, 剪切阶段的  $\kappa_{ws}(s)$  很小, 且比等向压缩时  $\kappa_w(s)$  (表 1) 明显减小,  $\sigma_3$  和  $s$  对  $\kappa_{ws}(s)$  的影响很小, 可以近似认为在转折点之前  $e_w$  保持不变。

(7) 确定出不同试验条件下  $p_{yws}$ ,  $\lambda_{ws}(s)$  见表 2。

可见, 对于相同  $s$ , 除  $s=50$  kPa 时,  $\lambda_{ws}(s)$  的绝对值随  $\sigma_3$  的增大先减小后增大外,  $\lambda_{ws}(s)$  的绝对值及  $p_{ysw}$  皆随  $\sigma_3$  的增大而减小, 即相同吸力下, 剪切过程中水量变化随净围压增大而减小, 且饱和土明显比非饱和土的大。对于相同  $\sigma_3$ ,  $s$  对非饱和土  $p_{yws}$ ,  $\lambda_{ws}(s)$  的影响程度与  $\sigma_3$  大小有关,  $\sigma_3$  ( $\leq 200$  kPa) 较小时,  $\lambda_{sw}(s)$  的绝对值及  $p_{yws}$  随  $s$  的增大皆呈增大的趋势, 即相同净围压下, 剪切过程中水量变化随吸力的增大而增大。 $\sigma_3$  ( $\geq 200$  kPa) 较大时,  $\lambda_{sw}(s)$  的绝对值及  $p_{yws}$  随  $s$  的增大皆呈先增大后减小的趋势, 即水量变化随吸力的增大而先增大后减小。

表 2 固结排水三轴剪切试验的土性参数

Table 2 Soil parameters for consolidated drained shear tests									
$s$ /kPa	$\sigma_{3c}$ /kPa	$p_{yws}$ /kPa	$\lambda_{ws}/s$	$S_{rc}$ /%	$S_{rf}$ /%	$M(s)$	$\mu(s)$ /kPa	$c$ /kPa	$\varphi$ /( $^\circ$ )
0	50	10	0.224	100	100	1.15	15	7	25.8
0	100	30	0.164	100	100	1.15	15	7	25.8
0	200	50	0.162	100	100	1.15	15	7	25.8
0	400	80	0.146	100	100	1.15	15	7	25.8
0	600	120	0.144	100	100	1.15	15	7	25.8
50	50	36	-0.026	54.1	60.7	1.12	67	31	25.2
50	100	66	-0.021	55.7	65.1	1.12	67	31	25.2
50	200	85	0.003	62.7	74.8	1.12	67	31	25.2
50	400	150	0.005	72.8	94.2	1.12	67	31	25.2
50	600	180	0.016	77.8	96.8	1.12	67	31	25.2
100	50	57	-0.039	41.7	47.1	1.07	118	55	24.4
100	100	70	-0.022	44.0	51.4	1.07	118	55	24.4
100	200	90	-0.012	50.6	60.1	1.07	118	55	24.4
100	400	160	-0.011	51.7	65.6	1.07	118	55	24.4
100	600	230	-0.011	55.5	74.7	1.07	118	55	24.4
200	50	60	-0.046	34.4	38.7	0.97	168	79	22.6
200	100	85	-0.034	34.6	40.6	0.97	168	79	22.6
200	200	95	-0.018	35.4	42.9	0.97	168	79	22.6
200	400	100	-0.008	35.8	48.1	0.97	168	79	22.6
200	600	120	-0.006	43.8	53.6	0.97	168	79	22.6

3.2 临界状态特性

对于硬化型  $q - \varepsilon_1$  关系曲线, 以  $\varepsilon_1=15\%$  作为破坏标准, 确定出临界状态下净平均应力  $p$ , 偏应力  $q$  及土水体积比  $e_w$ 。不同吸力  $s$  下,  $q - p$  及  $e_w - \ln p$  临界状态线如图 3 所示。从图 3 (a) 可以看出:

(1) 不同  $s$  下,  $q - p$  临界状态线皆可拟合为直线, 斜率和截距分别用  $M(s)$ ,  $\mu(s)$  表示,  $\mu(s)$ ,  $M(s)$  值见表 2。黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\varphi$  可根据  $c=(3-\sin \varphi)/(6 \cos \varphi) \cdot \mu(s)$ ,  $\varphi=\sin ^{-1}[3 M(s) /(6+M(s))]$  确定。

(2) 随着  $s$  增大, 斜率  $M(s)$  及内摩擦角  $\varphi$  (表 2) 减小, 截距  $\mu(s)$  及黏聚力  $c$  增大, 即不同  $s$  下,  $q - p$  临界状态线并非平行, 随  $p$  增大, 逐渐逼近饱和黄土的临界状态线, 且当  $\sigma_3=600$  kPa 时 ( $s=50, 100, 200$  kPa, 饱和度  $S_{rf}$  (见表 2) 分别为 96.8%, 74.7%, 53.6%) 聚集于一点。表明净围压较小时, 需要考虑吸力对原状黄土临界状态线的影响, 净围压较大时, 可忽略吸力的影响, 非饱和与饱和原状黄土的临界状态线可以

归一, 这与文献[11]研究结果相一致。

(3)  $M(s)$ ,  $\mu(s)$  与吸力  $s$  有关,  $M(s) - s$ ,  $\mu(s) - \mu(0) - s$  关系如图 4 所示。 $M(s) - s$  及  $\mu(s) - \mu(0) - s$  关系可分别用线性及双曲线函数描述, 其表达式为:

$$M(s)=M(0)-a_0 s \quad (1)$$
$$\mu(s)-\mu(0)=s /(a+b s) \quad (2)$$

式中,  $a_0$ ,  $a$ ,  $b$  为土性参数,  $M(0)$ ,  $\mu(0)$  分别为饱和土临界状态线的斜率及截距。对于本文研究试样,  $M(0)$ ,  $\mu(0)$  见表 2,  $a_0=0.001$ ,  $a=0.777$ ,  $b=0.0025$ 。

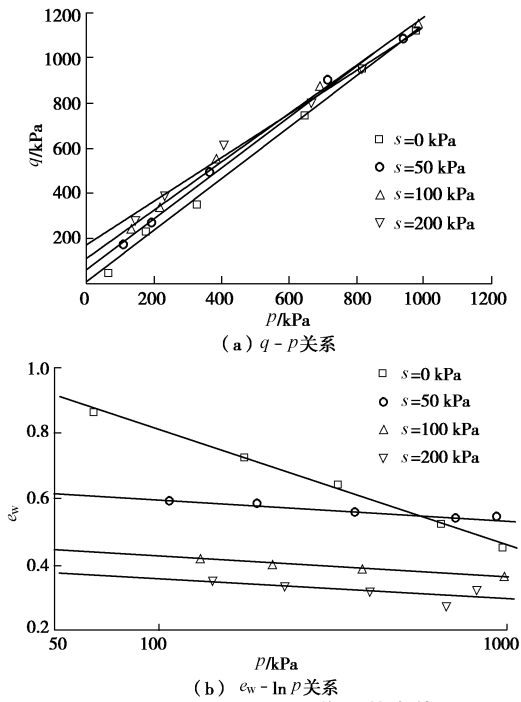


图 3  $q - p$  和  $e_w - \ln p$  临界状态线  
Fig. 3 Critical state lines on  $q - p$  and  $e_w - \ln p$

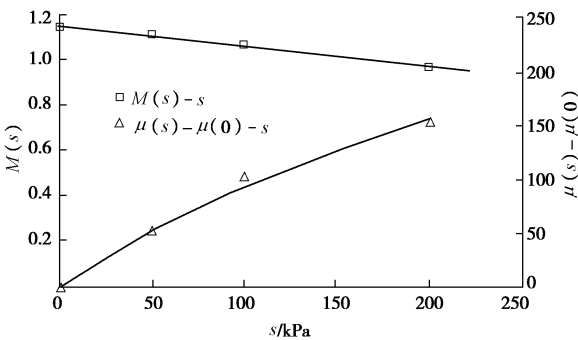


图 4  $M(s) - s$  和  $\mu(s) - \mu(0) - s$  关系  
Fig. 4 Curves of  $M(s) - s$  and  $\mu(s) - \mu(0) - s$

由上述及式 (1)、(2) 可得非饱和原状黄土临界状态线的表达式为

$$q= M(0)p+\mu(0)+[1/(a+bs)-a_0p]s \quad (\sigma_3<600 \text{ kPa}) \quad (3)$$
$$q= M(0)p +\mu(0) \quad (\sigma_3\geq 600 \text{ kPa}). \quad (4)$$

可见, 非饱和原状黄土临界状态线不能用 Fredlund<sup>[12]</sup> 提出的表达式  $q=M(s)p+M_b s$  描述 ( $M(s)$ ,  $M_b$  皆为常数)。

从  $e_w - \ln p$  临界状态线 (图 3 (b)) 可以看出: 不同吸力  $s$  下,  $e_w - \ln p$  曲线近似为直线, 斜率用  $\lambda_{ws}(s)$

表示。 $s \geq 50$  kPa 时, 曲线随  $s$  减小而平行上移, 即不同吸力下  $\lambda_{ws}(s)$  相同, 皆为 0.027, 且比饱和原状黄土 ( $\lambda_{ws}(s)=0.152$ ) 的小很多; 与等向压缩情况相比,  $\lambda_{ws}(s)$  皆比  $\kappa_w(s)$ ,  $\lambda_w(s)$  (见表 1) 大。

## 4 结 论

(1) 等向压缩应力条件下, 水土体积比(含水率)与净平均应力的对数关系呈先缓慢后较快减小的趋势, 转折点的净平均应力近似为结构性屈服应力, 且可用两段直线描述, 当吸力较大 ( $\geq 50$  kPa) 时, 可忽略吸力对其参数的影响。

(2) 三轴剪切应力条件下水量变化特性与等向压缩应力条件下明显不同, 视吸力及净围压大小不同, 水土体积比与净平均应力增量的对数关系呈先基本不变后增大或减小的趋势, 可用两段直线描述, 且吸力及净围压对转折点之后斜率的影响较大。

(3) 吸力对原状非饱和黄土  $q-p$  临界状态线的影响程度随净围压增大而减小, 当净围压较大 ( $\geq 600$  kPa) 时, 可忽略吸力的影响, 且不能用已有的临界状态模式描述。不同吸力下原状非饱和黄土的  $e_w - \ln p$  临界状态线皆近似为平行直线, 斜率比饱和土临界状态线的明显小, 但比屈服后等向压缩的大。

## 参考文献:

- [1] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, **23**(1): 3 - 13. (XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, **23**(1): 3 - 13. (in Chinese))
- [2] 陈正汉. 重塑非饱和黄土的变形、强度、屈服和水量变化特性[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(1): 82 - 90. (CHEN Zheng-han. Deformation, strength, yield and moisture change of a remolded unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(1): 82 - 90. (in Chinese))
- [3] 陈存礼, 张登飞, 董玉柱, 等. 常含水率三轴应力条件下非饱和原状黄土的吸力和力学特性[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(7): 1195 - 1202. (CHEN Cun-li, ZHANG Deng-fei, DONG Yu-zhu, et al. Suction and mechanical behaviours of unsaturated intact loess from constant water content triaxial tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(7): 1195 - 1202. (in Chinese))
- [4] 方祥位, 陈正汉, 申春妮, 等. 原状  $Q_2$  黄土三轴剪切特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(2): 383 - 389. (FANG Xiang-wei, CHEN Zheng-han, SHEN Chun-ni, et al. Triaxial shear properties of undisturbed loess  $Q_2$ [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(2): 383 - 389. (in Chinese))
- [5] 关 亮, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 非饱和和重塑黄土的三轴试验研究[J]. 工程勘察, 2011, **11**(2): 14 - 18. (GUAN Liang, CHEN Zheng-han, HUANG Xue-feng, et al. Study of the tri-axial experiment for the remodeled unsaturated loess[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2011, **11**(2): 14 - 18. (in Chinese))
- [6] 扈胜霞, 周云东, 陈正汉. 非饱和原状黄土强度特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(4): 660 - 663. (HU Sheng-xia, ZHOU Yun-dong, CHEN Zheng-han. Test study on strength character of unsaturated and undisturbed loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(4): 660 - 663. (in Chinese))
- [7] 李永乐, 张红芬, 余小光, 等. 原状非饱和黄土的三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(10): 2859 - 2863. (LI Yong-le, ZHANG Hong-fen, SHE Xiao-guang, et al. Experimental study of triaxial test of undisturbed unsaturated loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(10): 2859 - 2863. (in Chinese))
- [8] 马秀婷, 邵生俊, 杨春鸣, 等. 非饱和结构性黄土的强度特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 1): 68 - 75. (MA Xiu-ting, SHAO Sheng-jun, YANG Chun-ming, et al. Experimental research on the strength characteristic of unsaturated structural loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S1): 68 - 75. (in Chinese))
- [9] FRANCOISE G, LYESSE L, LAURENT V. Elasto-plasticity unsaturated soils: laboratory test results on a remoulded silt[J]. Soils and Foundations, 2006, **46**(5): 545 - 556.
- [10] 孙德安, 仰先才. 非饱和粉土的力学和水力特性试验[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2012, **18**(6): 627 - 633. (SUN De-an, YANG Xian-cai. Experimental study on hydro-mechanical behavior of unsaturated silt[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science), 2012, **18**(6): 627 - 633. (in Chinese))
- [11] MAATOUK A, LEROUEIL S, ROCHELLE P. Yielding and critical state of a collapsible unsaturated silty soil[J]. Géotechnique, 1995, **45**(3): 465 - 477.
- [12] FREDLUND D G, MORGENSTEM N R, WIDGER R S. The shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, **15**(3): 313 - 321.

(本文责编 孙振远)